

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

МОСКВА · 1974

УДК 523.43

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ МАРСА И НА ТРАССЕ ЗЕМЛЯ — МАРС ПРИ ПОМОЩИ ЛОВУШЕК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СОВЕТСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ 1971—1973 гг.

*Е. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. Е. Бреус,
М. И. Веригин, Г. И. Волков, А. В. Дьячков*

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ВДОЛЬ ОРБИТ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ МАРСА «МАРС-2» И «МАРС-3»

Приводятся результаты измерений характеристик электронной компоненты солнечного ветра и околопланетной плазмы при помощи ловушек заряженных частиц с тормозящими потенциалами, установленных на искусственных спутниках Марса — аппаратах «Марс-2» и «Марс-3». Обнаружена околопланетная ударная волна, за фронтом которой существенно возрастают концентрация электронов n_e , их температура T_e и регистрируются электроны с энергией $\approx 50\div 70$ эв. Среднее расстояние от поверхности Марса до фронта ударной волны оценено как ~ 2500 км, а до препятствия, создающего ударную волну — 1400 км. Если считать, что препятствием является собственное магнитное поле планеты, имеющее дипольный характер, то оценка магнитного момента Марса дает $2,4 \cdot 10^{22}$ гс·см³, что согласуется с величиной, даваемой Долгиновым и др. [29] по данным магнитных измерений на тех же спутниках Марса.

На космических аппаратах «Марс-2» и «Марс-3», выведенных на орбиты искусственных спутников Марса, соответственно, 27.XI и 2.XII 1971 г. измерялись характеристики электронной компоненты солнечного ветра при помощи идентичных электронных ловушек. В работах [1, 2] приводились предварительные результаты этих измерений. В статье [3] подробно описана постановка эксперимента, конструкция и результаты лабораторных исследований датчиков, электроника и приведены примеры первичных результатов измерений.

В настоящей работе рассматриваются характеристики электронной компоненты солнечного ветра, полученные во время нескольких оборотов вокруг планеты спутника «Марс-2», четырех оборотов спутника «Марс-3» (за период с 5.XII 1971 г. по 21.I 1972 г.¹) и на трассе при подлете аппарата «Марс-3» к планете (ноябрь 1971 г.); подробно излагается методика обработки экспериментальных данных.

1. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура и концентрация электронов окружающей спутник плазмы определяются, как описывалось в [3], методом тормозящих потенциалов, т. е. по зависимости электронного коллекторного тока ловушки от задерживающего напряжения, подаваемого на управляющую сетку (так называемой вольт-амперной характеристике или кривой торможения). Регистрируемый коллекторный ток является сложной функцией парамет-

¹ После 21.I 1972 г. усилитель тока электронной ловушки на «Марсе-3» вышел из строя.

ров прибора и окружающей среды. В общем случае ток может зависеть от концентрации n_e , температуры T_e и анизотропии температуры электронов (вызванной межпланетным магнитным полем), величины и направления скоростей солнечного ветра и аппарата, электрического потенциала, приобретаемого космическим аппаратом, формы аппарата, материала, из которого он сделан, и т. д. Ниже получено выражение для коллекторного тока электронной ловушки в зависимости от параметров электронов солнечного ветра и тормозящего напряжения, оценивается влияние потенциала аппарата на результаты определения характеристик электронов и уточняется оценка влияния фотоэмиссии с поверхности космического аппарата на проведенные измерения, сделанная в [3]. Заметим, что вкладом положительных ионов в коллекторный ток можно пренебречь, так как ловушка во время измерений была ориентирована с точностью $\pm 1^\circ$ в антисолнечном направлении (см. [3]) и, следовательно, находилась в «ионной тени».

Пусть на ловушку падает однородный поток электронов под углом θ к ее оси, e — заряд электрона, v — скорость, dn_e — концентрация электронов в потоке и $S(\theta)$ — площадь входного отверстия, с которой все электроны попадут на коллектор. В этом случае ловушка зарегистрирует ток $dI = dn_e e v \cos \theta S(\theta) \sigma(U)$, где $\sigma(U)$ — функция задерживающего потенциала. Используя результаты лабораторных исследований ловушки в моноэнергетических пучках ионов [3], для функции $\sigma(U)$ можно написать следующее приближенное выражение:

$$\sigma(U) = \begin{cases} 0, & v < \sqrt{2eU/\beta m} \\ \frac{\beta - 2eU/mv^2}{\beta - \alpha}, & \sqrt{2eU/\beta m} < v < \sqrt{2eU/\alpha m} \\ 1, & v > \sqrt{2eU/\alpha m}, \end{cases}$$

где $\alpha = 0,95$, $\beta = 1,13$ (см. рис. 5, а [3]).

Функцию $S(\theta)$ можно найти из рис. 5, б в [3], заметив, что на нем изображена зависимость величины $\cos \theta S(\theta)/S(0)$ от угла θ . Если $f(v, \theta, \varphi)$ — нормированная на единицу функция распределения электронов по скоростям в системе координат, связанной с аппаратом, то ток, регистрируемый ловушкой при подаче на нее задерживающего потенциала U , равен

$$I(U) = n_e e \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} v \cos(\theta) S(\theta) \sigma(U) f(v, \theta, \varphi) v^2 \sin \theta \, dv \, d\theta \, d\varphi. \quad (1)$$

Согласно измерениям электронной компоненты солнечного ветра, проведенным вблизи Земли на спутнике «Вела-4», для не слишком больших скоростей функция распределения может быть аппроксимирована максвелловским распределением в системе координат, движущейся с переносной скоростью положительных ионов [4]. Анизотропия электронной температуры по данным [4] мала, составляет $\sim 1,1$ и при дальнейших расчетах не учитывалась. Так как величина переносной скорости ионов ~ 400 км/сек (она направлена от Солнца), скорость аппарата ~ 30 км/сек, а ось ловушки ориентирована в антисолнечном направлении, то в системе координат, связанной с ловушкой, функция распределения запишется следующим образом:

$$f(v, \theta, \varphi) = \left(\frac{m}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} \exp \left\{ - \frac{m}{2k T_e} [v^2 + V^2 + 2vV(\cos \theta \cos \delta - \sin \theta \sin \delta \cos \varphi)] \right\}, \quad (2)$$

где m — масса, k — постоянная Больцмана, V — переносная скорость электронов в системе координат, связанной с аппаратом, $\delta \sim 5 \div 10^\circ$ — угол меж-

ду вектором V и осью ловушки, а угол φ отсчитывается от проекции вектора V на плоскость входного отверстия ловушки. Подставив выражение (2) в формулу (1) и проинтегрировав по φ , получим

$$I(U) = 2\pi n_e e \left(\frac{m}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} v^3 \sin \theta \cos \theta S(\theta) \sigma(U) \times \\ \times \exp \left[-\frac{m}{2kT_e} (v^2 + V^2 + 2vV \cos \theta \cos \delta) \right] I_0 \left(\frac{mvV}{kT_e} \sin \theta \sin \delta \right) dv d\theta, \quad (3)$$

где I_0 — модифицированная функция Бесселя.

Формулу (3) также можно записать в следующем виде:

$$I(U) = An_e \sqrt{T_e} \Psi \left(\frac{mV^2}{2kT_e}, U \right), \quad \text{где } A = \text{const.}$$

При $U=0$ и значениях V и T_e , характерных для солнечного ветра, $\Psi \left(\frac{mV^2}{2kT_e}, 0 \right)$ мало отличается от единицы и ток, соответствующий нуле-

вому потенциалу торможения $I_{\max} \sim An_e \sqrt{T_e}$, т. е. зависит от потока электронов из окружающей среды (пропорционального $n_e \sqrt{T_e}$), причем главным образом от концентрации n_e .

На рис. 1 кружками изображены вольт-амперные характеристики, полученные на борту аппарата «Марс-3» в разные моменты времени.

Плавные кривые представляют собой рассчитанные по формуле (3) на ЭВМ вольт-амперные характеристики ловушки при скорости солнечного ветра 450 км/сек и значениях температуры и концентрации электронов, указанных на рисунке. Подбор параметров этих кривых осуществлялся методом максимального правдоподобия, то есть так, чтобы рассчитанные кривые с наибольшей вероятностью соответствовали экспериментальным [5].

Оказалось, что если при определении электронной температуры считать переносную скорость равной $V=450$ км/сек, а угол между осью ловушки и вектором переносной скорости V равным нулю, изменения скорости V от 300 до 600 км/сек дадут ошибку в определении температуры порядка 5%;

с увеличением переносной скорости зависимость вольт-амперной характеристики от угла δ усиливается, но при $V=600$ км/сек отличие характеристик, рассчитанных при $\delta=0^\circ$ и $\delta=10^\circ$ составляет $\sim 1,5\%$.

Рассмотрим теперь влияние потенциала поверхности аппарата на точность определения электронной температуры. Тепловая скорость электронов солнечного ветра \bar{v} при температуре $T_e \sim 10^5$ К: $\bar{v} = \sqrt{2kT_e/m} \sim 1700$ км/сек и в 3–5 раз больше переносной скорости электронов. Поэтому для оценок будем считать аппарат покоящимся. Дебаевский радиус в невозмущенной плазме при плотности электронов $n_e \sim 5$ см $^{-3}$ составляет

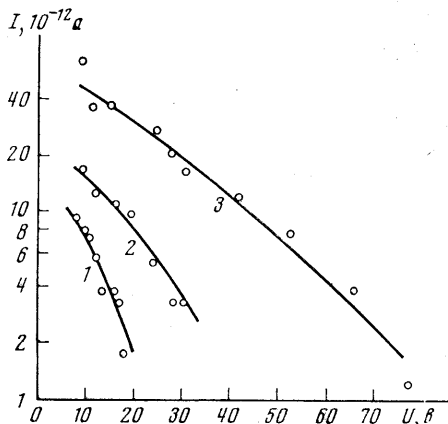


Рис. 1

1 — 18.I 1972 г., 22h25m (время Московское), $T_e \sim 70\ 000^\circ$ К, $n_e \sim 4,1$ см $^{-3}$; 2 — 19.I 1972 г., 20h15m, $T_e \sim 120\ 000^\circ$ К, $n_e \sim 4,4$ см $^{-3}$; 3 — 19.I 1972 г., 8h35m, $T_e \sim 180\ 000^\circ$ К, $n_e \sim 8,3$ см $^{-3}$.

$D = \sqrt{kT_e / 4\pi n_e e^2} \sim 10$ м. Так как размер аппарата $R < D$, то в его окрестности электрическое поле кулоновское (считаем грубо, что аппарат — сфера радиуса R) и при не слишком большом потенциале поверхности φ_0 ($\varphi_0 \ll kT_e D / eR \sim 50 \div 60$ в) на расстояниях от центра аппарата $r > D$ электрическое поле слабое ($\varphi \sim \varphi_0 (R/r) \ll kT_e / e$) и мало влияет на движение частиц [6]. Рассматривая движение электронов в таком поле, можно показать, что если при $r \rightarrow \infty$ распределение электронов максвелловское, то при положительном потенциале аппарата функция распределения электронов вблизи поверхности примет следующий вид:

$$f(v, \theta, \varphi) = \begin{cases} \left(\frac{m}{2\pi kT_e} \right)^{3/2} e^{(e\varphi_0/kT_e)} e^{-mv^2/kT_e}, & v > \sqrt{\frac{2e\varphi_0}{m}} \\ 0, & v < \sqrt{\frac{2e\varphi_0}{m}} \end{cases}$$

При отрицательных потенциалах поверхности перед функцией распределения появится множитель $e^{-e|\varphi_0|/kT_e}$. Подставив эти функции распределения в (1) и произведя интегрирование, получим следующий результат, изображенный на рис. 2. Из рисунка видно, что при положительных потенциалах корпуса и задерживающем потенциале на сетке $U > \beta\varphi_0$ ток, собираемый ловушкой, увеличивается в $e^{e\varphi_0/kT_e}$ раз, и, следовательно, в полулогарифмическом масштабе вид вольт-амперной характеристики не изменяется. При задерживающем потенциале на сетке $U < \alpha\varphi_0$ ток, собираемый ловушкой, не зависит от напряжения и в $\left(1 + \frac{e\varphi_0}{kT_e}\right)$ раз превышает ток при $\varphi_0 = 0$ и $U = 0$. При отрицательных потенциалах корпуса ток, собираемый ловушкой, уменьшается в $e^{e\varphi_0/kT_e}$ раз.

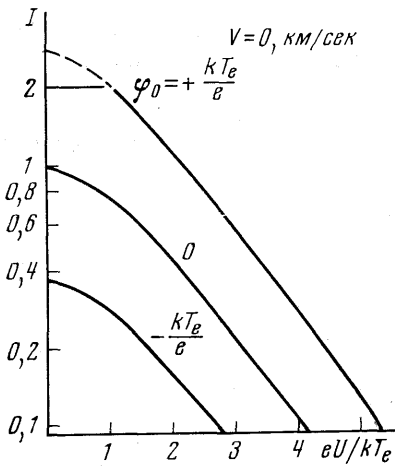


Рис. 2

Таким образом, выбрав для определения электронной температуры участок вольт-амперной характеристики при $U > \beta\varphi_0$, получим, что в рассматриваемом приближении потенциал корпуса не влияет на оценку температуры электронов.

Из [3] следует, что при тормозящих потенциалах > 10 в влиянием фототока на вольт-амперную характеристику можно пренебречь. Анализ данных, полученных с «Марса-3», показал, что кривые торможения, рассчитанные по экспериментальным точкам, соответствующим потенциалам торможения > 10 в, в большинстве случаев также хорошо описывают экспериментальные характеристики вплоть до задерживающих потенциалов $4 \div 6$ в. Это означает, что потенциал аппарата, по-видимому, не превышал нескольких вольт, так как в противном случае на вольт-амперной характеристике в точке, соответствующей потенциалу аппарата, должен был наблюдаться излом (см. рис. 2). При таких потенциалах аппарата фотоэлектроны с энергией, превышающей несколько эв, не возвращаются на поверхность аппарата. Поэтому при оценках температуры фототоком можно пренебречь, начиная с точек, соответствующих тормозящим потенциалам $4 \div 6$ в.

Оценки концентрации электронов менее надежны, чем оценки температуры, так как на них существенно сказывается влияние потенциала

корпуса, переносной скорости электронов, отличие прозрачности системы сеток ловушки для тепловых электронов от оптической, которая учитывалась при расчетах.

Концентрация электронов n_e рассчитывалась в предположении, что потенциал корпуса $\phi_0=0$ и переносная скорость электронов $V \sim 450$ км/сек. При изменении переносной скорости электронов от 300 до 600 км/сек оценка концентрации может оказаться завышенной или заниженной соответственно в $\sim 1,3$ раза. Положительный потенциал корпуса завысит оценку n_e в e^{ϕ_0/kT_e} раз, т. е. при потенциалах корпуса порядка нескольких вольт расчетная величина n_e может быть больше истинной в $1,5 \div 2$ раза.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Как уже отмечалось выше, в настоящей статье приводятся данные, полученные при помощи электронной ловушки на спутниках «Марс-2» и «Марс-3» в ноябре 1971 г. — январе 1972 г. На рис. 3 показана одна из орбит «Марса-2» и эволюция орбит «Марса-3» за рассматриваемый период времени в полярной системе координат, у которой ось абсцисс совпадает с направлением Солнце — Марс, а полярный угол равен углу Солнце — Марс — спутник. «Марс-2» имеет орбиту с перигеиумом ~ 1300 км, апогеиумом ~ 28000 км, его период обращения $17^h 55^m$.

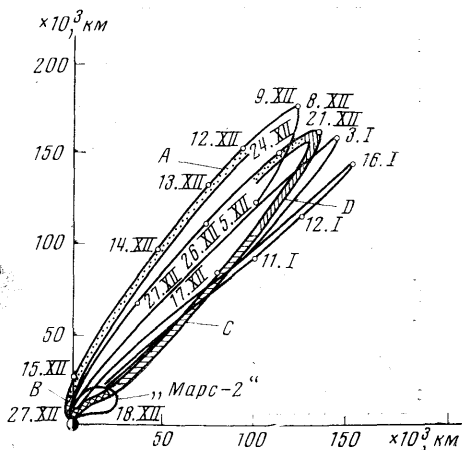


Рис. 3

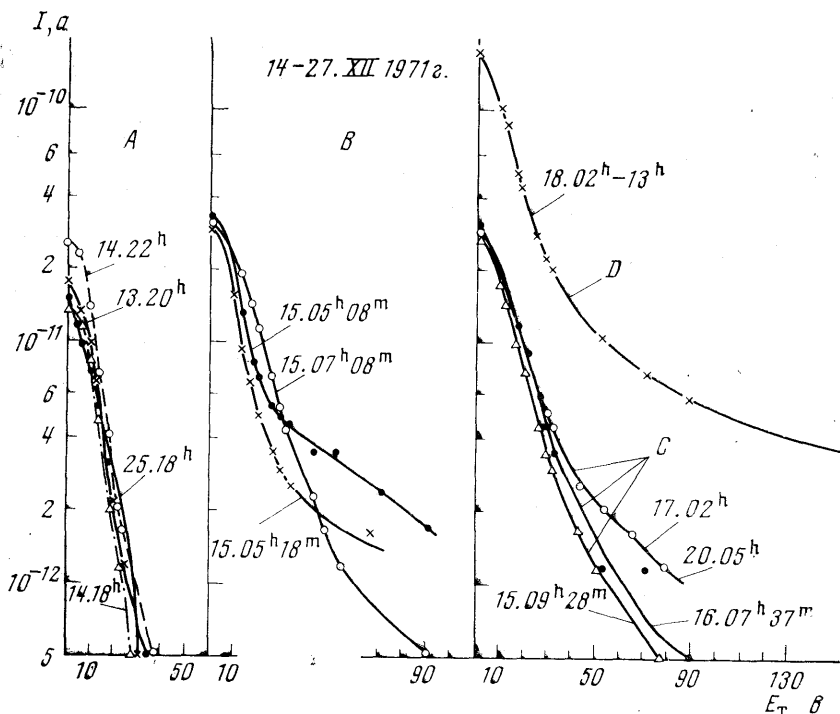


Рис. 4

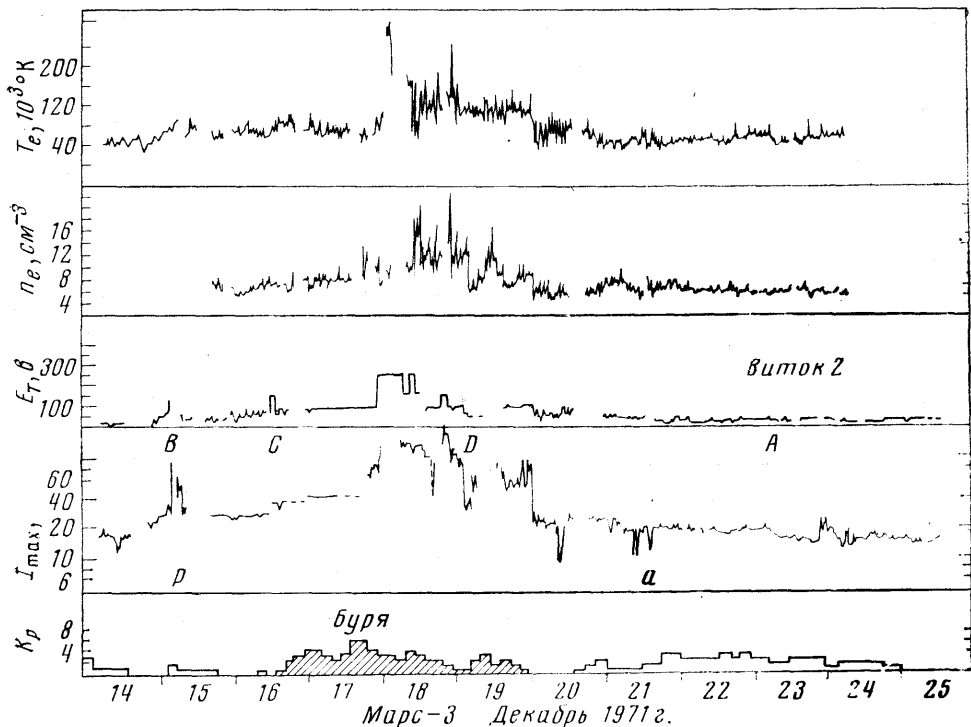


Рис. 5

Перицентр и апоцентр спутника «Марс-3» равны соответственно ~ 1400 и ~ 212000 км, а период обращения $\sim 12^d 16^h 30^m$.

Во время указанных на рис. 3 оборотов «Марса-3» вокруг планеты были зарегистрированы повторяющиеся в общих чертах вариации кривых торможения и соответственно характеристик электронов вдоль орбит. Четыре характерные зоны, на которые условно можно разделить орбиты, показаны на этом рисунке различной штриховкой и буквами для второго оборота спутника (с 12 по 25.XII 1971 г.). Зона А соответствует нисходящему участку орбиты, зона В — району перицентра, зона С — восходящему участку, а зона D — району апоцентра орбиты. Примеры вольт-амперных характеристик, типичных для этих четырех зон, показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при движении «Марса-3» вдоль орбиты вид кривых торможения значительно менялся, в частности, в широких пределах менялись величины I_{\max} и потенциалы полного торможения E_T (величины тормозящих напряжений на анализирующих сетках ловушек, при которых регистрация электронов прекращалась).

Выше было показано, что величина $I_{\max} \sim An_e \sqrt{T_e}$ (без учета фотоэлектронов) определяется в основном концентрацией электронов n_e солнечного ветра. В действительности, известный вклад в величину I_{\max} вносят фотоэлектроны с освещенной части поверхности спутника и вторичные электроны (см. [3]). Следует, однако, подчеркнуть, что так как ориентация спутника относительно Солнца во время описываемых измерений оставалась неизменной и так как интенсивность той части спектра солнечного излучения, которая вызывает фотоэмиссию, весьма стабильна [7], то наблюдавшиеся значительные вариации I_{\max} (до порядка величины) не могут быть приписаны изменениям фотоэмиссии, а отображают вариации электронов в окружающей спутник плазме.

Рост T_e , естественно, вызывает увеличение E_T ; однако главной причиной возрастания E_T является рост интенсивности потоков «надтепловых электронов» (соответствующих «надтепловым» хвостам функции распре-

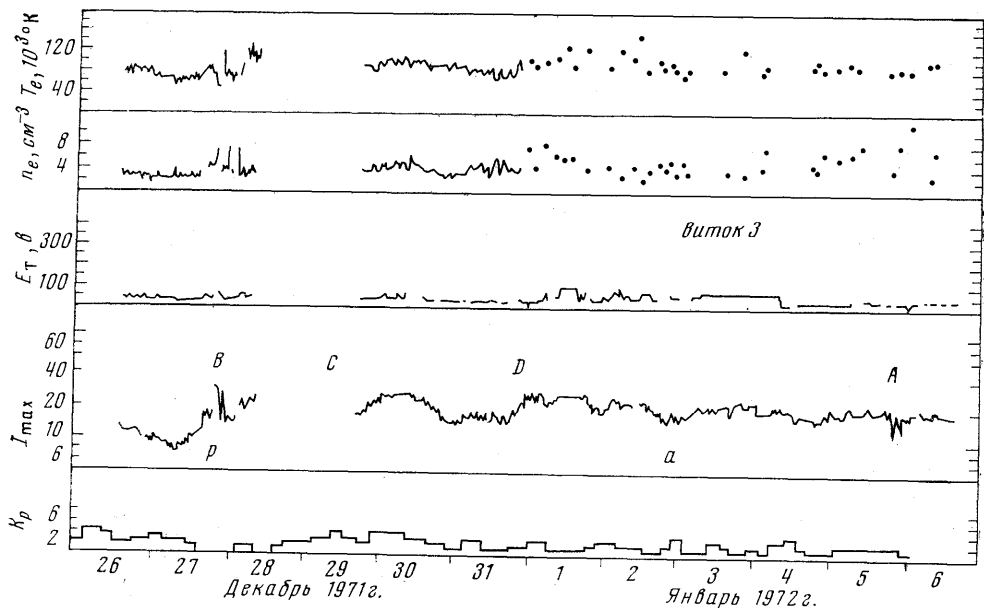


Рис. 6

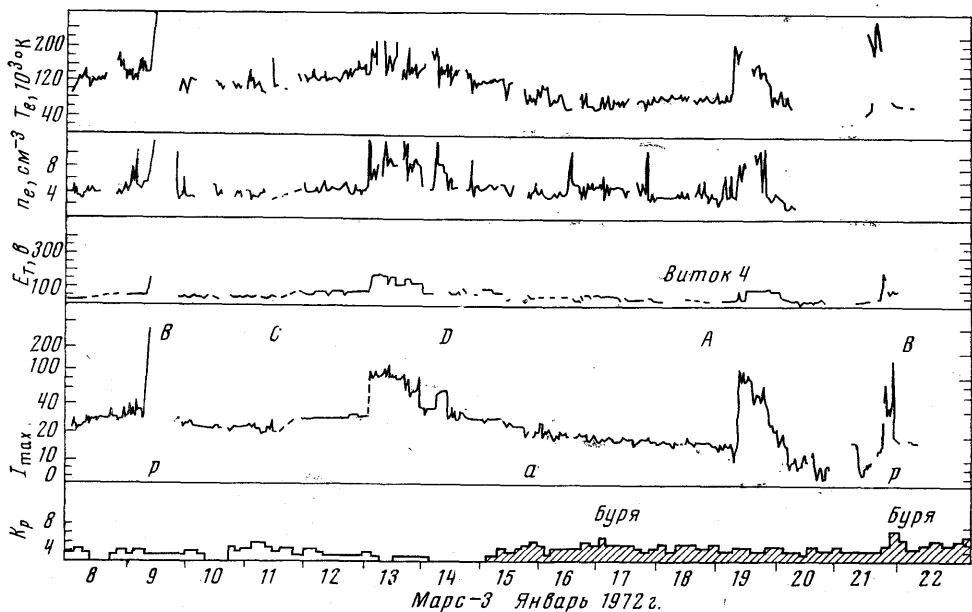


Рис. 7

деления). Такие электроны наблюдались чувствительными приборами в невозмущенном солнечном ветре на спутниках Земли серии «Вела» [4, 8] и в переходной области за фронтом околоземной ударной волны. Появление электронов с энергией $\sim 50 \div 100$ эв использовалось в качестве признака пересечения фронта околоземной ударной волны на спутнике ОГО-5 [9].

Таким образом, вариации величин I_{\max} и E_T , которые можно получить прямо из кривых торможения без их обработки, довольно наглядно характеризуют изменения окружающей спутник плазмы. Поэтому на рис. 5–7

изображены вариации I_{\max} и E_{τ} вдоль орбит спутника «Марс-3»¹. На этих же рисунках построены значения электронной концентрации n_e и температуры T_e , вычисленные по описанной выше методике. В нижней части рисунков приведены значения K_p -индексов, характеризующих возмущения магнитного поля на Земле (они будут использованы при интерпретации результатов). Буквами p и a обозначены перигеи и апогеи орбит, а буквами A, B, C, D — зоны, на которые условно разделены орбиты.

Рассмотрим их особенности. Хотя явления, наблюдавшиеся в зонах каждого из витков спутника «Марс-3», обладали определенным сходством, однако имелись и некоторые различия от оборота к обороту.

Для зоны A характерны потенциалы полного торможения $30 \div 40$ в и сравнительно небольшие токи I_{\max} . Электронная концентрация и температура в этой зоне изменяются в пределах $3 \div 6 \text{ см}^{-3}$ и $(60 \div 100) \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ соответственно. Форма кривых торможения близка к расчетной, что свидетельствует о наличии максвелловского распределения. «Надтепловые» электроны, создающие «хвосты» на кривых торможения (наблюдавшиеся в невозмущенном солнечном ветре у орбиты Земли Монгомери и др. [4]), не обнаруживаются в пределах чувствительности прибора. На четвертом витке, однако, 19.I 1972 г. (рис. 7) в зоне A наблюдалось возмущение, во время которого сильно возросли I_{\max} и E_{τ} (появились «надтепловые хвосты»). Температура и концентрация электронов также выросли до значений $\sim 200 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ и $\sim 12 \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Кривые торможения, полученные на восходящих участках орбит (зона C), были подобны кривым торможения в зоне A и отличались от них не-

сколько большими значениями I_{\max} . T_e и n_e также превышали характерные для зоны A величины и составляли $(90 \div 140) \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ и $4 \div 6 \text{ см}^{-3}$. На втором витке в зоне C регистрировались «надтепловые хвосты».

При приближении к апогеям на восходящих участках орбит «Марса-3» (зона D) было отмечено возрастание I_{\max} — до порядка величины, E_{τ} — до $150 \div 270$ в, T_e — до $300 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ и n_e — до 20 см^{-3} . На третьем витке эти возмущения слабо выражены.

В зоне B также наблюдались возмущения, характеризующиеся резким возрастанием (за промежуток времени между двумя последовательными измерениями) значений рассматриваемых параметров.

Для первого витка данные в зонах B и C отсутствуют, на 2—4-м витках вблизи перигеионов плазменные и магнитные приборы выключались, и только 21.I при прохождении перигея прибор не выключался.

На рис. 8, а показано изменение вида вольт-амперных характеристик, наблюдавшееся в течение нескольких часов в области перигея

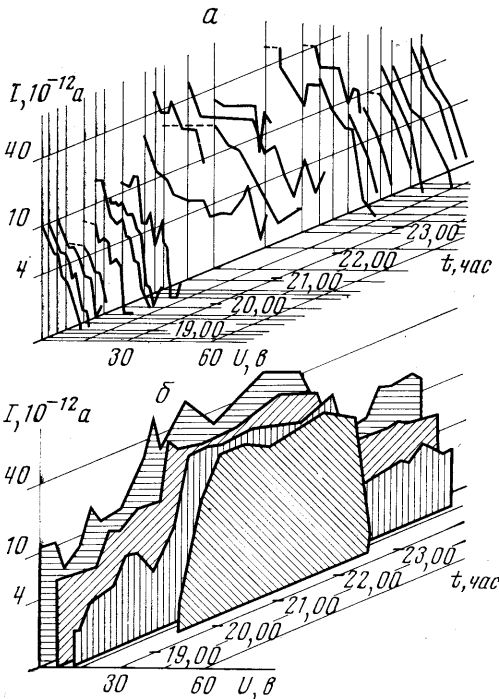


Рис. 8

¹ На рис. 5—7 и 9 I_{\max} даны в 10^{-12} а .

21.I 1972 г. Изменение тока в ловушке для четырех фиксированных значений задерживающих потенциалов за тот же промежуток времени показано на рис. 8, б. Можно видеть, что в интервале времени 20^h—22^h искажается вид вольт-амперных характеристик, возрастает I_{\max} и появляются энергичные электроны. По искаженным вольт-амперным характеристикам трудно сделать разумные оценки T_e и n_e . В тех случаях, когда это удалось сделать, оказалось, что T_e возрастала до значений $(200 \div 300) \cdot 10^3$ °K, а n_e до ~ 20 см⁻³.

Возмущения в зоне В можно отождествить с ударной волной, образованной при взаимодействии солнечного ветра с планетой, и они будут подробнее рассмотрены ниже.

В зонах А, С и D электронная ловушка, по-видимому, регистрировала невозмущенный планетой солнечный ветер на орбите Марса. В таком случае возмущения, наблюдавшиеся вдали от планеты, можно объяснить изменениями структуры солнечного ветра. Сопоставим вариации K_p -индексов, определенных по наблюдениям наземных станций, и параметров солнечного ветра, измеренных на орбите Земли при помощи спутников «Вела» [10], с вариациями параметров электронов на орбите Марса за рассматриваемый период времени.

Во время четвертого витка вдали от планеты наблюдались два возмущения (13—14 и 19—20 января). С 15 по 19 и с 21 по 29.I на Земле были зарегистрированы магнитные бури (см. рис. 7). Скорости и концентрация солнечного ветра по данным аппарата «Вела-3» в эти же периоды времени существенно возрастали от значений 350 км/сек и ~ 5 см⁻³ до 600—700 км/сек и ~ 20 см⁻³ [10]. На Солнце происходили интенсивные вспышки. При сопоставлении этих событий следует учесть временной сдвиг, который должен существовать из-за взаимного расположения Марса, Земли и Солнца. В январе 1972 г. Марс отставал от Земли по азимуту вращения на угол $\Delta\alpha \sim 50 \div 65^\circ$ и находился дальше от Солнца, чем Земля на расстояниях $\Delta R \sim 70 \div 75$ млн. км. Временной сдвиг событий можно оценить из следующего соотношения [11]:

$$\Delta t = -\frac{\Delta R}{V_R} + \frac{\Delta\alpha}{\Omega},$$

где $\Omega = 13,3^\circ/\text{сутки}$ — угловая скорость вращения Солнца, V_R — радиальная скорость распространения возмущения в солнечном ветре. При скорости распространения возмущения $V_R \approx 300 \div 500$ км/сек для Δt получаются значения $\sim 2 \div 3$ суток, причем возмущения солнечного ветра на Марсе должны регистрироваться раньше, чем на Земле. Отсюда можно заключить, что 15 и 21.I на Земле наблюдались возмущения, зарегистрированные ранее на орбите Марса 13 и 19.I 1972 г.

Не удалось установить связь между явлениями, обнаруженными вблизи Марса и вблизи Земли во время первого и третьего витков «Марса-3» (см. например, рис. 6). На Земле в эти периоды времени не наблюдалось каких-либо особенностей: K_p -индекс изредка возрастал до значений 4 на фоне значений 0—1. Третий виток «Марса-3» можно охарактеризовать

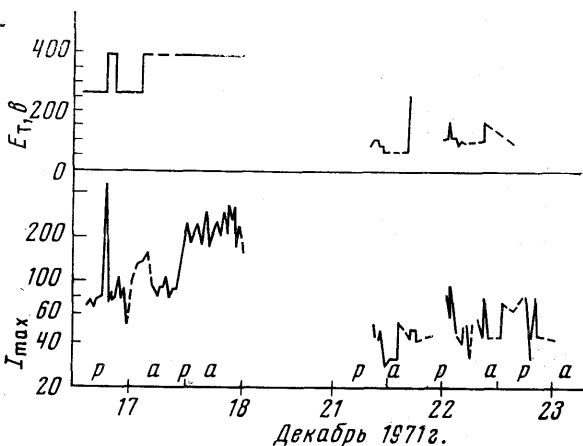


Рис. 9

как однородно слабо возмущенный с меньшими возрастаниями I_{\max} и E_T вблизи перигея, чем на других витках.

Во время второго витка «Марса-3» (рис. 4, 5) на Земле 16.XII в 21 час началась сильная магнитная буря с максимальным индексом $K_p=7$. Возмущения продолжались до 19.XII. Соответствующие возмущения солнечного ветра на орбите Марса должны были наблюдаться примерно на двое суток раньше. В самом деле, 14.XII после 22^h на вольт-амперных характеристиках, регистрируемых «Марсом-3», несколько возросли I_{\max} и в 24^h появились «надтепловые хвосты». Возмущение продолжалось до 20.XII, причем имело наибольшую амплитуду 18.XII (15.XII примерно в 5^h30^m на фоне этого возмущения наблюдалась околопланетная ударная волна).

Возмущения солнечного ветра, подобные описанным выше, наблюдались в ноябре 1971 г. на «Марсе-3», когда аппарат находился в солнечном ветре, заведомо невозмущенном планетой.

Данные одновременных измерений на аппаратах «Марс-2» и «Марс-3» во время второго витка аппарата «Марс-3» (рис. 5 и 9) также показывают, что явления в электронной компоненте плазмы, обнаруженные вдали от планеты, относятся к вариациям солнечного ветра. Из рис. 5 и 9 видно, что 18.XII возмущения солнечного ветра одновременно регистрировались на обоих космических аппаратах, а в спокойный период 22–23.XII на обоих аппаратах I_{\max} и E_T существенно уменьшились. При чем «Марс-2» не удалялся от планеты далее, чем на 28 тыс. км, а «Марс-3» в это время находился на расстояниях >150 тыс. км. Одновременная регистрация появлений и исчезновений возмущений на обоих аппаратах, находившихся в различных областях околопланетного пространства, свидетельствует о том, что наблюдавшиеся вариации отражали изменения «солнечной погоды».

Согласно магнитогидродинамической теории, в солнечном ветре может наблюдаться пять видов разрывов: тангенциальный, контактный, вращательный разрывы и ударные волны (быстрая и медленная) [12]. В возмущениях, зарегистрированных на больших удалениях от планеты, происходило одновременное возрастание температуры, концентрации (см. рис. 5, 7) и магнитного поля¹. Это позволяет предположить, что наблюдавшиеся возмущения связаны с прохождением межпланетных ударных волн. Действительно, в случае вращательных разрывов температура и концентрация не должны изменяться, в контактных разрывах увеличение концентрации должно сопровождаться уменьшением температуры, а в тангенциальных разрывах увеличение температуры и концентрации должно сопровождаться уменьшением магнитного поля [12]. В околопланетной ударной волне также наблюдаются подобные одновременные изменения параметров солнечного ветра.

Вернемся теперь к рассмотрению взаимодействия солнечного ветра с планетой Марс.

Взаимодействие солнечного ветра с Землей изучено довольно хорошо (см. обзоры [8, 9, 12, 13] и др.). На многих космических аппаратах при помощи магнитометров и плазменных приборов наблюдались фронт ударной волны, переходная область, магнитопауза. Экспериментальные данные, относящиеся к обтеканию солнечным ветром других планет, пока немногочисленны. Возмущение солнечного ветра Венерой (у которой не обнаружено собственное магнитное поле) наблюдалось 18.X 1967 г. при помощи плазменных ловушек и магнитометров на аппарате «Венера-4» [14, 15], 19.X 1967 г. на аппарате «Маринер-5» [16], и 17.V 1969 г. при помощи плазменных ловушек на аппарате «Венера-6» [17].

¹ Данные одновременных измерений магнитного поля 18.XII 1971 г. во время возмущения любезно предоставлены нам Ш. Ш. Долгиновым, Е. Г. Ерошенко и Л. Н. Жужовым.

Вблизи Марса до 1971 г. был проведен единственный эксперимент на «Маринере-4», в котором зарегистрировано слабое возмущение межпланетного магнитного поля на расстоянии $\sim 15 \cdot 10^3$ км от Марса при однократном пролете аппарата (см. обзор [18]). Несмотря на то что однократно зарегистрированное возмущение магнитного поля могло объясняться явлениями в самом солнечном ветре, не связанными с планетой (такие межпланетные ударные волны нередко наблюдаются в солнечном ветре), оно интерпретировалось как пересечение аппаратом фронта околomarсианской ударной волны, причины происхождения которой впоследствии неоднократно обсуждались в различных теоретических работах [19].

Предполагалось, что причиной возникновения ударной волны вблизи Марса может быть препятствие, образованное либо собственным магнитным полем Марса с величиной магнитного момента $2,1 \cdot 10^{-4}$ от магнитного момента Земли (т. е. $\sim 1,7 \cdot 10^{22}$ эс·см³) [18], либо ионосферой [20–23]. В последнем случае рассматривались либо прямое взаимодействие солнечного ветра с ионосферой (с учетом фотохимии, процессов перезарядки и т. д.) [22], либо тангенциальный разрыв между плазмой солнечного ветра и ионосферой планеты [21], либо так называемый магнитный барьер [23].

Положение фронта ударной волны зависит от размеров препятствия, останавливающего солнечный ветер. Поэтому экспериментальное определение положения фронта ударной волны вблизи планеты позволяет оценить размеры препятствия и, следовательно, исключить некоторые из упомянутых выше гипотез, предсказывающих размеры препятствия, противоречащие полученным из экспериментов.

В [2] приводились предварительные результаты оценок размера препятствия по положениям фронта ударной волны, наблюдавшейся при помощи электронных ловушек на «Марсе-2» и «Марсе-3». Эти оценки были сделаны в предположении сферической формы препятствия при использовании простейших газодинамических соотношений [24]. Было получено, что средний радиус препятствия равен ~ 4500 км, а среднее ареоцентрическое расстояние до лобовой точки фронта ~ 5500 км.

Ниже оцениваются размеры препятствия в соответствии с расчетами положения фронта ударной волны, сделанными в [12], в предположении, что оно имеет форму вытянутого тела вращения, подобную форме земной магнитосферы. На рис. 10 показаны участки орбит аппаратов «Марс-2» и «Марс-3», на которых они пересекали фронт ударной волны. Критерием пересечения фронта околomarсианской ударной волны, как и в ряде случаев для околоземной ударной волны [4, 8, 9], считалось появление «надтепловых» электронов и резкое возрастание остальных параметров (n_e , T_e , I_{\max}). Кривые торможения, полученные в ближайших к планете точках изображенных на рис. 10 участков орбит, характерны для переходной области за фронтом ударной волны, а в наиболее удаленных от планеты точках этих участков — для невозмущенного планетой солнечного ветра. Направление стрелок соответствует направлению движения спутников, а длина участков орбит зависит от режима работы прибора (8.I, 21.I и 12.V 1972 г. измерения проводились в двухминутном режиме, 15.XII 1971 г. и 9.I 1972 г. в 10-минутном и 17.XII 1971 г. в 20-минутном режимах (см. [3])). Сплошной линией показаны форма и размеры препятствия, а штриховой — положение фронта ударной волны, для числа Маха $M_\infty = 8$ [25] и $\gamma = 5/3$, рассчитанное в соответствии с [12].

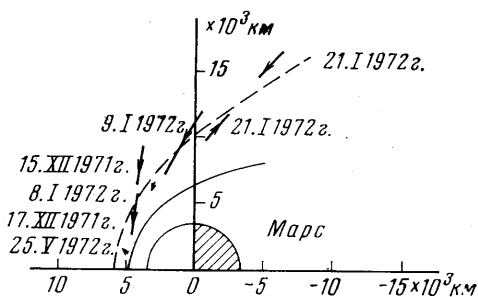


Рис. 10

Размеры препятствия выбраны таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний от обоих концов, изображенных на рис. 10 участков траекторий до фронта ударной волны, образованной этим препятствием, была минимальной. Ареоцентрическое расстояние до лобовой точки препятствия составляет ~ 4800 км, а до лобовой точки фронта ударной волны — 5900 км (соответственно ~ 1400 и ~ 2500 км от поверхности Марса). Оба значения несколько выше, чем в [2]. Полученная величина препятствия не согласуется с гипотезами [21, 22]. Согласно этим гипотезам, препятствием, останавливающим солнечный ветер, является ионосфера Марса. При этом в [21] размер препятствия определяется условием баланса динамического давления солнечного ветра и давления ионосферных заряженных частиц (т. е. граница проходит на высоте ~ 170 км), а в [22] термализованный солнечный ветер останавливается на высоте 100 – 200 км над поверхностью Марса.

Действительно, как следует из экспериментальных данных о высотном распределении электронной концентрации в ионосфере Марса, полученных по наблюдениям радиозатмений тех же аппаратов «Марс-2» и «Марс-3» [26] и аппарата «Маринер-9» [27, 28], максимум ионосферной ионизации расположен на высоте ~ 140 км и уже на высотах ~ 300 – 350 км давление марсианской ионосферы примерно на два порядка меньше динамического давления солнечного ветра на орбите Марса. Однако результаты наших наблюдений легко объяснить, если предположить, что препятствием, создающим ударную волну, является магнитное поле.

Если у Марса имеется собственное магнитное поле и магнитосфера, то величину магнитного момента Марса можно оценить по следующей формуле [12]: $M_M = D^3 \sqrt{2\pi k \rho_\infty V_\infty^2}$, где $k=0,88$; ρ_∞ и V_∞ — плотность и скорость солнечного ветра; D — ареоцентрическое расстояние до носовой точки магнитосферы. Для $D=4800$ км (см. размеры препятствия, оцененные выше), концентрации протонов 3 см^{-3} и $V_\infty \sim 400 \text{ км/сек}$ величина магнитного момента Марса $M_M = 2,4 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$. Магнитные измерения, проведенные одновременно с нашими на тех же спутниках [29], привели авторов к выводу, что у Марса может существовать собственное дипольное магнитное поле. Величина магнитного момента, определенная в работе [29], согласуется с нашими оценками. Оценки M_M , сделанные в статье [18] по данным «Маринера-4» приводившиеся: ранее, также не противоречат нашим.

Подтверждением гипотезы о существовании у Марса собственного магнитного поля, высказанной в работе [29], могут служить результаты одновременных измерений характеристик плазмы и магнитного поля на орбитах спутников «Марс-2» и «Марс-3» с аналогичными измерениями вблизи Земли и Венеры.

На рис. 11 приводятся значения трех компонент магнитного поля, взятые из работы [29], токов в электронной ловушке при нулевом потенциале торможения (I_{\max}) и электронных температур (T_e), полученные 21.1 1972 г. (см. рис. 7) при прохождении аппаратом «Марс-3» области перигенра. Из рисунка видно, что в моменты времени, когда происходило резкое возрастание (уменьшение) I_{\max} и T_e , т. е. аппарат «Марс-3» пересекал фронт ударной волны, магнитометр также зарегистрировал возрастание (уменьшение) величины магнитного поля и уровня его флуктуаций. На рис. 11 эти моменты обозначены цифрами 1 и 4. В соответствии с [29] цифрами 2 и 3 обозначена граница предполагаемой магнитосферы Марса. В момент 2 величина магнитного поля резко возрастала и вплоть до момента 3 сохраняла повышенные значения по сравнению со значениями в переходном слое за фронтом ударной волны. В том же интервале времени 2–3 величина I_{\max} (в основном определяющаяся потоком электронов) имела в среднем значительно меньшие значения, чем в переходном слое (интервалы времени 1–2 и 3–4).

Как известно, одновременные измерения характеристик плазмы и магнитного поля B проводились в окрестностях еще двух планет — Земли и Венеры. Собственное магнитное поле у Венеры либо отсутствует, либо весьма мало [15], поэтому поведение плазмы и магнитного поля по мере приближения к Венере после пересечения фронта ударной волны отличается от картины, наблюдающейся у Земли. Приближаясь к Земле, спутник пересекает магнитопаузу, выходя из переходного слоя в магнитосферу; в этот момент магнитное поле возрастает и становится регулярным, а концентрация n_e и поток N заряженных частиц падает (в пере-

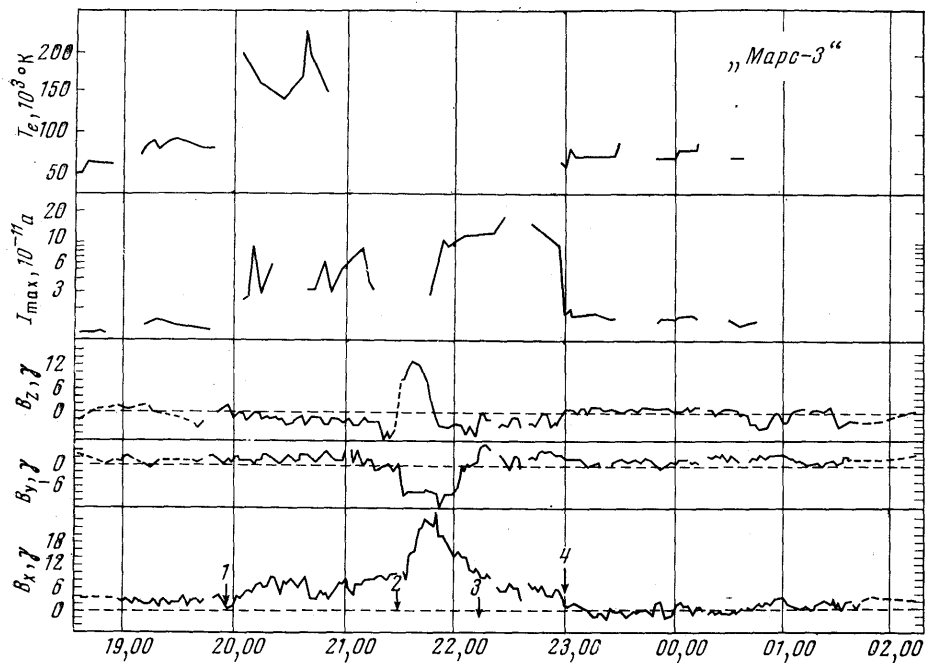


Рис. 11

ходном слое n_e) значительно выше, чем в пограничном слое внутри магнитосферы (см., например, [30–32]). Иная картина наблюдается у Венеры: при приближении к планете аппарата «Венера-4» величины $|B|$ и N на протяжении $\sim 20 \cdot 10^3$ км изменяются практически синхронно до момента прекращения измерений на высоте ~ 300 км [14].

Легко видеть, что одновременные вариации плазмы и магнитного поля вблизи Марса значительно больше напоминают подобные вариации плазмы и магнитного поля в околоземном пространстве, чем в околовенерианском. Авторам представляется, что рис. 11 подтверждает правильность предположения о существовании у Марса собственного магнитного поля и о марсианской магнитосфере как препятствии, создающем околопланетную ударную волну. Совместное рассмотрение одновременных измерений характеристик электронной компоненты плазмы и магнитного поля для ряда проходов спутников вблизи планеты будет проведено в дальнейшем в отдельной публикации.

ВЫВОДЫ

1. Температура электронов не взаимодействующего с планетой солнечного ветра в спокойных и слабо возмущенных условиях на орбите Марса в период измерений составляла $(60 \div 120) \cdot 10^3$ К при концентрации электронов $(3 \div 6) \text{ см}^{-3}$.

2. Обнаружена ударная волна, образующаяся при взаимодействии солнечного ветра с планетой. Для числа Маха $M_\infty = 8$ расстояние до фронта ударной волны в лобовой точке $\sim 0,7R_M$.

3. При пересечении аппаратами «Марс-2» и «Марс-3» фронта околопланетной ударной волны существенно возрастала электронная температура (до значений $(200 \div 300) \cdot 10^3$ °К), концентрация (до ~ 20 см⁻³) и появились энергичные электроны с $E_T > 50 \div 70$ э.

4. На трассе при подлете аппаратов к планете и на больших удалениях от планеты $((80 \div 100) \cdot 10^3$ км) на орбитах искусственного спутника Марса были зарегистрированы межпланетные ударные волны.

5. В межпланетных ударных волнах происходило резкое возрастание T_e до $300 \cdot 10^3$ °К, n_e до 20 см⁻³; появились «надтепловые» электроны с $E_T > 150 \div 270$ э. Появление этих возмущений коррелирует с магнитными возмущениями и бурями, происходившими на Земле.

6. Сопоставления измерений электронной компоненты солнечного ветра и магнитного поля на аппаратах «Марс-2» и «Марс-3» показали, что как в околопланетной, так и в межпланетных ударных волнах, одновременно с возрастанием T_e , n_e и появлением «надтепловых» электронов происходило существенное возрастание величины магнитного поля и уровня его флуктуаций.

7. Положение фронта околomarсианской ударной волны, определенное по измерениям электронов, и сравнение вариаций плазмы и магнитного поля вблизи Марса, Земли и Венеры позволяют заключить, что причиной образования ударной волны у Марса является магнитное поле. Если у Марса собственное дипольное магнитное поле, то величину его магнитного момента M_M можно оценить в $\sim 2,4$ гс·см³, что согласуется с величиной M_M , рассчитанной из данных магнитных измерений в [29].

Дата поступления
10 декабря 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukih et al. *Icarus*, 18, 54, 1973.
2. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukih et al. *J. Geophys. Res.*, 78, 5808, 1973.
3. К. И. Грингауз В. В. Безруких и др. *Космич. исслед.*, 12, № 3, 1974.
4. M. D. Montgomery, S. J. Bame, A. J. Hundhausen. *J. Geophys. Res.*, 73, 4999, 1968.
5. Д. Худсон. *Статистика для физиков*. М., «Мир», 1967, стр. 196.
6. А. В. Гуревич, Л. П. Пугачевский, В. В. Смирнова. *Успехи физ. наук*, 99, 3, 1969.
7. D. F. Heath. *J. Geophys. Res.*, 78, 2779, 1973.
8. M. D. Montgomery, J. E. Asbridge, S. J. Bame. *J. Geophys. Res.*, 75, 1217, 1970.
9. M. Neugebauer, C. T. Russell, J. V. Olson. *J. Geophys. Res.*, 76, 4366, 1971.
10. *Solar Geophys. Data (Comprehensive report)*, U. S. Department, of Commerce Publ., May, June, July 1973.
11. P. J. Coleman, Jr., E. J. Smith, L. Davis, Jr., D. E. Jones. *J. Geophys. Res.*, 74, 2826, 1969.
12. Дж. Р. Спрайгер, А. И. Алксне. В кн. «Физика магнитосферы», М., «Мир», 1972, стр. 19.
13. J. H. Wolfe, D. S. Intrilligator. *Space Sci. Rev.*, 10, 511, 1970.
14. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Л. С. Мусатов, Т. К. Бреус. *Космич. исслед.*, 6, № 3, 411, 1968.
15. Ш. Ш. Долгинов, Л. Н. Жузгов, Е. Г. Ерошенко. *Космич. исслед.*, 6, № 4, 561, 1968.
16. H. S. Bridge, A. J. Lazarus et al. *Science*, 158, 1669, 1967.
17. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Г. И. Волков, Л. С. Мусатов, Т. К. Бреус. *Космич. исслед.*, 8, № 3, 431, 1970.
18. M. Dryer, G. P. Heckman. *Solar Phys.*, 2, 112, 1967.
19. F. S. Michel. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 9, 2, 427, 1971.
20. A. J. Dessler. In «The atmosphere of Venus and Mars», ed. by J. C. Brandt, M. B. McElroy. New York, London, Paris, 1968, p. 241.
21. J. K. Spreiter, A. L. Summers, A. W. Rizzi. *Planet. Space Sci.*, 18, 281, 1970.
22. P. A. Cloutier, M. B. McElroy, F. S. Michel. *J. Geophys. Res.*, 74, 6215, 1969.
23. F. S. Johnson, J. E. Midgley. *Space Res.*, 9, 760, 1969.
24. T. Obayashi. *J. Geophys. Res.*, 69, 861, 1964.
25. M. Dryer. *Cosmic Electrode.*, 1, 115, 1970.
26. М. А. Колосов, Н. А. Савич и др. *Радиотехника и электроника*, 18, № 10, 2009, 1973.

27. A. J. Kliore, G. Fjeldbo, B. L. Seidel, D. L. Cain, M. J. Sykes, S. I. Rasool. *Icarus*, 17, 484, 1972.
 28. A. J. Kliore, G. Fjeldbo, B. L. Seidel, M. J. Sykes. *P. M. Woiseshyn. Science*, 175, 313, 1972.
 29. Ш. Ш. Долгиков, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Докл. АН СССР, 207, 1296, 1972.
 30. K. I. Gringauz, G. N. Zastenker, M. Z. Khokhlov. Variations of magnetopause location according to charged trap particle data from satellites «Prognoz» and «Prognoz-2», preprint, Report to IAGA, Symposium, Kyoto, Japan, 1973.
 31. E. W. Hones, Jr. Magnetospheric plasma flow and the nature of the magnetospheric boundary layer, preprint LA — UR 73—732, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1973.
 32. J. H. Wolfe, D. D. McKibbin. In «Physics of the Magnetosphere», ed. by R. L. Carovillano, J. F. McClay, H. R. Radovski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht — Holland, 1969, p. 435.
-